

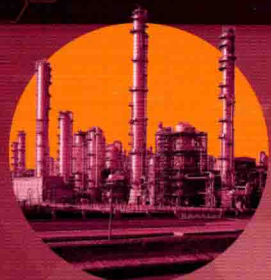
高等学校规划教材

HUAGONG YUANLI SHIYAN



化工原理实验

都健 王瑶 王刚 主编



化学工业出版社

高等学校规划教材

HUAGONG YUANLI SHIYAN



化工原理实验

都健 王瑶 王刚 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

化工原理实验是配合化工原理课堂理论教学设置的实验课,是教学中的实践环节。《化工原理实验》系统介绍了实验的研究方法和设计方法、实验数据的测量及误差、实验数据的处理、化工过程常见物理量测量等基本内容。重点介绍了化工重要单元操作的相关化工原理实验,实验内容既有验证型基本实验,又有综合型以及创新型实验。

《化工原理实验》可供化工、制药、轻工、石油、食品、环境等相关专业的本科生使用,也可供相关科技人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

化工原理实验/都健,王瑶,王刚主编. —北京:化学工业出版社,2017.6
高等学校规划教材
ISBN 978-7-122-29544-6

I. ①化… II. ①都…②王…③王… III. ①化工原理-实验-高等学校-教材 IV. ①TQ02-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第087843号

责任编辑:徐雅妮 丁建华

装帧设计:王晓宇

责任校对:王素芹

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 装:三河市延风印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张8¼ 字数188千字 2017年9月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:25.00元

版权所有 违者必究

前 言

化工原理实验是深入学习化工过程及设备原理、将过程原理联系工程实际、掌握化工单元操作研究方法的重要课程,是培养和训练化工技术人才分析解决工程实际问题能力的重要环节。通过化工原理实验课程的教学和实验训练,使学生深入地理解和应用化工原理基本理论,初步掌握化工生产中典型单元操作的操作技能和方法;培养学生严谨的科学研究态度,良好的实验素养及独立解决问题、数据处理和实验设计能力;树立科学的工程观念,为学生今后从事化工行业的工作打下良好基础。

本书是大连理工大学化工原理教研室教师多年教学实践的总结,编写时进一步将实验教学对象与内容拓宽加深,同时引入实验教学改革的最新成果,以满足化工类人才培养的新要求。

本书主要介绍了化工原理实验基础知识、实验研究方法和设计方法、实验数据的测量及误差、实验数据的处理、化工过程常见物理量测量和典型的化工原理实验。实验内容分三个层次:第一个层次是基本实验内容,该部分实验的主要目的在于对学生进行化工过程实验的基本训练;第二个层次是进行综合型和设计型实验的研究,学生可以根据综合型实验的情况进行实验内容设计,提高发现、分析和解决实际问题的能力;第三个层次是创新型实验内容,这部分作为基础好的学生的选做实验及创新型实验训练。本书实验内容具有多功能性和创新性,突出单元操作基本原理的灵活运用,不仅适合大连理工大学开发的实验装置,还可以为其他《化工原理实验》教材的编写和类似实验装置的开发提供借鉴。

全书共5章,其中第1章的1.1~1.3节由都健编写,1.4节由俞路编写;第2章由王瑶编写;第3章由都健编写;第4章由王刚、姜晓滨编写;第5~7章的实验1由王刚、姜晓滨编写,实验2和实验4由吴雪梅、李祥村编写,实验3由肖武、姜晓滨编写,实验5由俞路编写,实验6和实验9由王瑶编写,实验7由都健、刘琳琳编写,实验8由潘艳秋编写,实验10由肖武编写,实验11由王维编写。全书由都健、王瑶、王刚主编并统稿。

本书的编写工作还得到了大连理工大学化工原理教研室其他老师的帮助与支持,在此表示诚挚的谢意。本书在编写过程中参考了许多同类教材和专著,在此谨向相关作者表示感谢。

由于作者水平所限,书中难免有不妥和疏漏之处,敬请指正。

编者

2017年6月

目 录

第 1 章 绪论 /1

- 1.1 化工原理实验的特点和目的 /1
- 1.2 实验的研究方法和设计方法 /1
 - 1.2.1 实验的研究方法 /1
 - 1.2.2 实验的设计方法 /2
- 1.3 化工原理实验教学要求 /6
- 1.4 化工原理实验安全知识 /7

第 2 章 实验数据的测量及误差 /11

- 2.1 实验数据的测量 /11
 - 2.1.1 测量参数和实验点的选择 /11
 - 2.1.2 数据的读取 /11
 - 2.1.3 有效数字的计算规则 /12
- 2.2 实验数据的误差 /13
 - 2.2.1 误差的表示方法 /14
 - 2.2.2 误差的分类 /15
 - 2.2.3 间接测量值的误差估算 /17

第 3 章 实验数据的处理 /18

- 3.1 实验数据的列表法 /18
- 3.2 实验数据的图示法 /18
- 3.3 实验数据的方程式表示法 /20
- 3.4 曲线拟合与最小二乘法 /28
 - 3.4.1 线性回归 /29
 - 3.4.2 非线性回归 /38
- 3.5 插值法 /40

第 4 章 化工过程常见物理量测量 /43

- 4.1 温度测量 /43
 - 4.1.1 温度检测方法 /43

- 4.1.2 热电偶 /43
- 4.1.3 热电阻 /46
- 4.1.4 热电偶、热电阻的安装及注意事项 /47
- 4.2 压力和压差测量 /47
 - 4.2.1 液柱式压力计 /47
 - 4.2.2 弹性式压力计 /47
 - 4.2.3 电气式压力计 /49
 - 4.2.4 压力仪表的选用及安装 /51
- 4.3 流量测量 /52
 - 4.3.1 测速管 /53
 - 4.3.2 孔板流量计 /53
 - 4.3.3 文丘里流量计 /53
 - 4.3.4 转子流量计 /54
 - 4.3.5 流量计的选用及安装 /55

第 5 章 化工原理基本实验 /56

- 实验 1 流体阻力实验 /56
- 实验 2 过滤实验 /60
- 实验 3 液-液萃取实验 /64
- 实验 4 干燥实验 /68

第 6 章 化工原理综合实验 /74

- 实验 5 流量计校正及离心泵综合实验 /74
- 实验 6 传热综合实验 /82
- 实验 7 气体的吸收与解吸综合实验 /90
- 实验 8 精馏综合实验 /97

第 7 章 化工原理创新型实验 /107

- 实验 9 微通道反应过程强化实验 /107
- 实验 10 反应精馏实验 /110
- 实验 11 水循环系统自组装实训实验 /119

参考文献 /124

第 1 章

绪 论

1.1 化工原理实验的特点和目的

化工原理课程是化学工程与工艺及相关专业的重要基础课。其主要任务是研究生产过程中各种单元操作的规律，并用这些规律解决生产中的工程问题。本课程在培养从事化工科学研究和工程技术人才过程中发挥着重要作用。

化工原理实验是配合化工原理课堂理论教学设置的实验课，是教学中的实践环节。化工原理实验不同于基础课实验，具有典型的工程实际特点。实验都是按各单元操作原理设置的，其工艺流程、操作条件和参数变量，都比较接近于工业应用，并要求实验人员运用工程的观点去分析、观察和处理数据。实验结果可以直接用于或指导工程计算和设计。学习、掌握化工原理的实验及其研究方法，是学生从理论学习到工程应用的一个重要实践过程。通过实验可以达到以下教学目的：

- ① 配合理论教学，通过实验从实践中进一步学习、掌握和运用学过的基本理论。
- ② 运用学过的化工基本理论，分析实验过程中的各种现象和问题，培养训练学生分析问题和解决问题的能力。
- ③ 了解化工实验设备的结构、特点，学习常用实验仪器仪表的使用，使学生掌握化工实验的基本方法，并通过实验操作训练学生的实验技能，通过设计型综合实验，提高学生素质。
- ④ 应用计算机进行实验数据的分析处理，编写报告，培养训练学生实际计算和组织报告的能力。
- ⑤ 通过实验培养学生良好的学风和工作作风，以严谨、科学、求实的精神对待科学实验与开发研究工作。

1.2 实验的研究方法和设计方法

1.2.1 实验的研究方法

化学工程学科，如同其他工程学科一样，除了生产经验的总结之外，实验研究是学科建立和发展的重要基础。多年来，化工原理在发展过程中形成的研究方法有：直接实验法、理论指导下的实验研究方法（量纲分析法）和数学模型法等几种。

（1）直接实验法

直接实验法是解决工程实际问题最基本的方法。一般是指对特定的工程问题进行直接

实验测定,从而得到需要的结果。这种方法得到的结果较为可靠,但它往往只能用于条件相同的情况,具有较大的局限性。例如物料干燥,已知物料的湿分,利用空气作干燥介质,在空气温度、湿度和流量一定的条件下,直接实验测定干燥时间和物料失水量,可以作出该物料的干燥曲线,如果物料和干燥条件不同,所得干燥曲线也不同。

对一个多变量影响的工程问题进行实验,为研究过程的规律,用网络法实验测定,即依次固定其他变量,改变某一个变量测定目标值。如果变量数为 m 个,每个变量改变条件数为 n 次,按这种方法规划实验,所需实验次数为 n^m 次。依这种方法组织实验,所需实验数目非常大,难以实现。所以实验需要在一定理论指导下进行,以减少工作量,并使得到的结果具有一定的普遍性。量纲分析法是化学工程实验研究广泛使用的一种方法。

(2) 量纲分析法

量纲分析法,所依据的基本原则是物理方程的量纲一致性。将多变量函数整理为简单的量纲为一数群(又称特征数)之间的函数,然后通过实验归纳整理出量纲为一数群之间的具体关系式,从而大大减少实验工作量,同时也容易将实验结果应用到工程计算和设计中。量纲分析法的具体步骤是:

- ① 找出影响过程的独立变量;
- ② 确定独立变量所涉及的基本量纲;
- ③ 构造变量和自变量间的函数式,通常以指数方程的形式表示;
- ④ 用基本量纲表示所有独立变量的量纲,并写出各独立变量的量纲式;
- ⑤ 依据物理方程的量纲一致性和 π 定理得出量纲为一数群方程;
- ⑥ 通过实验归纳总结量纲为一数群的具体函数式。

例如,流体在管内流动的阻力和摩擦系数 λ 的计算研究,是利用量纲分析法和实验得到解决的,可参见相关教材。利用量纲分析法,也可以得到各种传热过程的量纲为一数群之间的关系。

(3) 数学模型法

数学模型法是近二十年产生、发展和日趋成熟的方法,但这一方法的基本要素在化工原理各单元中早已应用,只是没上升到模型方法的高度。数学模型法是在对研究的问题有充分认识的基础上,将复杂问题作合理简化,提出一个近似实际过程的物理模型,并用数学方程(如微分方程)表示成数学模型,然后确定该方程的初始条件和边界条件,求解方程。高速大容量电子计算机的出现,使数学模型法得以迅速发展,成为化学工程研究中的强有力工具。但这并不意味着可以取消和削弱实验环节。相反,对工程实验提出了更高的要求。一个新的、合理的数学模型,往往是在现象观察的基础上,或对实验数据进行充分研究后提出的,新的模型必然引入一定程度的近似和简化,或引入一定参数,这一切都有待于实验进一步的修正、校核和检验。

1.2.2 实验的设计方法

实验设计就是根据已确定的实验内容,拟定一个具体的实验安排表以及对实验所得数据如何进行分析等。化工原理实验通常涉及多变量多水平的实验设计,如何安排和组织实验,用最少的实验获取最有价值的实验结果,成为实验设计的核心内容。实验的设计方法常用的有关术语和符号有:

① 实验指标 在实验中用来衡量实验效果的指标，如产量、转化率、纯度等。

② 因素 指作为实验研究过程的自变量，常常是造成实验指标按某种规律发生变化的那些原因，如温度、流量、操作压力等。常用 A、B、C 等表示。

③ 水平 指实验中因素所处的具体状态或条件称为水平，常用 A_1 、 A_2 、 A_3 等表示。如某化学反应温度对转化率有影响，温度就是因素，温度的不同取值，如 80°C 、 100°C 、 150°C 等即因素的水平。

化工实验中常用的设计方法如下。

(1) 全面搭配法

全面搭配法又称网格法或析因法，该方法的特点是将各个因素的各个水平逐一搭配，每一种搭配即构成一个实验点。如在某实验中，要考察 A、B、C 三个因素对某个参数的影响，且每个因素取 3 个水平，用全面搭配法安排实验的话，需要做 27 次实验。图 1.1、表 1.1 给出了 3 因素 3 水平的全面搭配法实验设计示意图及实验设计方案表。

由此可见，若实验因素个数为 n ，每个因素的水平数为 m ，则完成整个实验所需的实验次数为 m^n 。显然，若要考察的变量数比较多时，实验次数要显著增加。因此，当涉及的变量数较多时，不适合采用此种方法。

表 1.1 3 因素 3 水平全面搭配法的
实验设计方案表

$A_1 B_1 C_1$	$A_2 B_1 C_1$	$A_3 B_1 C_1$
$A_1 B_1 C_2$	$A_2 B_1 C_2$	$A_3 B_1 C_2$
$A_1 B_1 C_3$	$A_2 B_1 C_3$	$A_3 B_1 C_3$
$A_1 B_2 C_1$	$A_2 B_2 C_1$	$A_3 B_2 C_1$
$A_1 B_2 C_2$	$A_2 B_2 C_2$	$A_3 B_2 C_2$
$A_1 B_2 C_3$	$A_2 B_2 C_3$	$A_3 B_2 C_3$
$A_1 B_3 C_1$	$A_2 B_3 C_1$	$A_3 B_3 C_1$
$A_1 B_3 C_2$	$A_2 B_3 C_2$	$A_3 B_3 C_2$
$A_1 B_3 C_3$	$A_2 B_3 C_3$	$A_3 B_3 C_3$

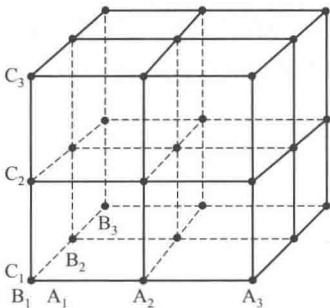


图 1.1 3 因素 3 水平全面
搭配法实验设计示意

(2) 正交实验设计法

正交实验设计法是一种科学地安排与分析多因素实验的方法。它利用正交表来安排实验、计算和分析实验结果。该方法的特点是：

① 所需的实验次数少；

② 数据点分布均匀；

③ 可以方便地应用极差分析法、方差分析法对实验结果进行处理，获得许多有价值的重要结论。

使用正交实验设计法进行实验方案的设计，就必须用到正交表。下面以 $L_8(2^7)$ 为例说明正交表符号的含义， $L_8(2^7)$ 正交表的形式见表 1.2。

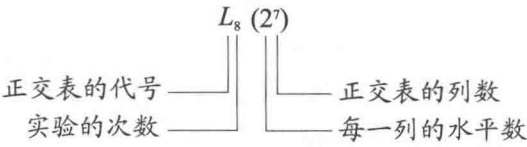


表 1.2 $L_8(2^7)$ 正交表的形式

列号 实验号	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

从表 1.2 中可以看出，正交表具有两个特点：

① 每个因素的各个水平在表中出现的次数相等。即每个因素在其各个水平上都具有相同次数的重复实验。如表 1.2 中，每列对应的水平“1”与水平“2”都是出现 4 次。

② 任意两列并列在一起形成若干个有序数字对，不同有序数字对出现的次数也都相同。即任意两列的水平搭配是均衡的。如第 2 列和第 5 列并列在一起形成的有序数字对共有 4 种：(1,1)、(1,2)、(2,1)、(2,2)，每种数字对出现的次数相等，这里都是 2 次。

正是由于正交表具有上述特点，保证了用正交表安排的实验方案中因素水平的搭配是均衡的，数据点的分布是均匀的。

下面用一个图来说明正交实验法的数据点分布。如一个 3 因素（用 A、B、C 表示）3 水平的实验，可选用 $L_9(3^1)$ 正交表来安排实验。图 1.2、表 1.3 给出了该正交实验设计示意图及实验方案表。

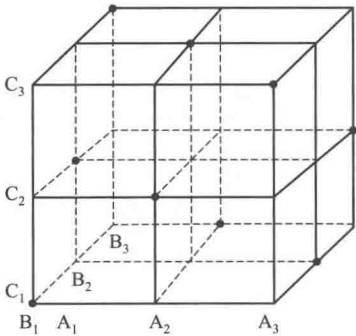


图 1.2 3 因素 3 水平正交
实验设计示意

表 1.3 $L_9(3^1)$ 正交实验方案表

列号 实验号	1 A	2 B	3 C	4
1	1(A ₁)	1(B ₁)	1(C ₁)	1
2	1(A ₁)	2(B ₂)	2(C ₂)	2
3	1(A ₁)	3(B ₃)	3(C ₃)	3
4	2(A ₂)	1(B ₁)	2(C ₂)	3
5	2(A ₂)	2(B ₂)	3(C ₃)	1
6	2(A ₂)	3(B ₃)	1(C ₁)	2
7	3(A ₃)	1(B ₁)	3(C ₃)	2
8	3(A ₃)	2(B ₂)	1(C ₁)	3
9	3(A ₃)	3(B ₃)	2(C ₂)	1

在实验指标、实验因素和水平确定后，正交实验设计按如下步骤进行。

① 列出因素水平表，即以表格的形式列出影响实验指标的主要因素及其对应的水平，

所考虑的因素可以是定量的，也可以是定性的。每个因素的水平一般以 2~4 个水平为宜，水平的间距应根据专业知识和已有的资料来确定。

② 选用正交表。因素水平一定时，选用正交表时应从实验的精度要求、实验工作量及实验数据处理这三方面加以考虑。一般的选用原则是：因素的水平数和正交表的水平数相同，正交表的列数大于或等于所考虑的因素和交互作用的个数。

③ 表头设计。将各因素和交互作用正确地安排在正交表的相应列中。安排因素的顺序是，先排定涉及交互作用多的因素，再安排两者的交互作用列，最后安排不涉及交互作用的因素。交互作用列的位置可根据所选用的正交表的两列间相互作用表来确定。

④ 制定实验安排表。根据表头设计结果，把各因素水平的具体数值填入表中，形成一个具体的实验安排表。

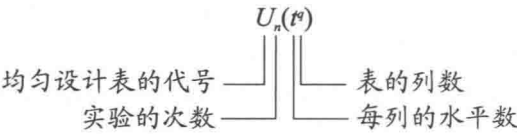
⑤ 进行实验。根据实验安排表进行实验，每一行代表一个实验条件，操作时只考虑因素的具体取值，不必考虑交互作用列和空列的取值。交互作用列和空列仅用于数据处理和结果分析。

⑥ 对实验结果进行分析。有两种分析方法，即极差分析法和方差分析法。通过这两种分析方法可以得到各因素（包括交互作用）对实验指标的影响程度大小、实验指标随各因素取不同水平时的变化趋势、最优操作条件，以及进一步实验方向。

(3) 均匀实验设计法

均匀实验设计法是我国数学家方开泰用数论方法，单纯地从数据点分布的均匀性角度出发所提出的一种实验设计法。该方法是利用均匀设计表来安排实验，所需的实验次数要少于正交实验设计法。

均匀设计表名称的表示方法及其意义如下：



均匀实验设计法的特点是：

① 实验工作量更少，这是均匀实验设计的一个突出的优点。如要考察 4 个因素的影响，每个因素 5 个水平，可用表 1.4 所示的“均匀实验设计表 $U_5(5^4)$ ”来安排实验，只需进行 5 次实验。实验次数明显减少的主要原因：在表的每一列中，每一个水平必出现且只出现一次。

表 1.4 均匀实验设计表 $U_5(5^4)$

列号 实验号	1	2	3	4
1	1	2	3	4
2	2	4	1	3
3	3	1	4	2
4	4	3	2	1
5	5	5	5	5

② 因素安排在均匀实验设计表中的哪一列不是随意的,需根据实验中要考察的实际因素数,依照附在每一个均匀实验设计表后的“使用表”来确定因素应该放在哪几列。

③ 均匀实验设计法不能像正交实验设计法那样,用方差分析法处理数据,而需用回归分析法来处理实验数据。

④ 在均匀实验设计中,随着水平数的增加,实验次数只有少量的增加,如水平数从 9 增加到 10 时,实验次数也从 9 增加到 10。这也是均匀实验设计法的一个很大的优点。一般认为,当因素的水平数大于 5 时,就宜选择均匀实验设计法。

1.3 化工原理实验教学要求

(1) 实验准备工作

实验前必须认真预习实验教材和化工原理教材有关章节,仔细了解所做实验的目的、要求、方法和基本原理。在全面预习的基础上写出预习报告(内容包括:目的、原理、实验方案及预习中的问题),并准备好实验记录表格。

进入实验室后,要对实验装置的流程、设备结构、测量仪表做细致的了解,并认真思考实验操作步骤、测量内容与测定数据的方法。对实验预期的结果、可能发生的故障和排除方法,做一些初步的分析和估计。

实验开始前,小组成员应进行适当分工,明确要求,以便实验中协调工作。设备启动前要检查、调整设备进入启动状态,然后再送电、送水或蒸汽之类等,启动操作。

(2) 实验操作、观察与记录

设备的启动与操作,应按教材说明的程序逐项进行,对压力、流量、电压等变量的调节和控制要缓慢进行,防止剧烈波动。

在实验过程中,应全神贯注地精心操作,要详细观察所发生的各种现象,例如物料的流动状态等,这将有助于对过程的分析 and 理解。

实验中要认真仔细地测定数据,将数据记录在规定的表格中。对数据要判断其合理性,在实验过程中如遇数据重复性差或规律性差等情况,应分析实验中的问题,找出原因加以解决。必要的重复实验是需要的,任何草率的学习态度都是有害的。

做完实验后,要对数据进行初步检查,查看数据的规律性,有无遗漏或记错,一经发现应及时补正。实验记录应请指导教师检查,同意后再停止实验并将设备恢复到实验前的状态。

实验记录是处理、总结实验结果的依据。实验应按实验内容预先制作记录表格,在实验过程中认真做好实验记录,并在实验中逐渐养成良好的记录习惯。记录应仔细认真,整齐清楚。要注意保存原始记录,以便核对。以下是几点参考意见:

① 对稳定的操作过程,在改变操作条件后,一定要等待过程达到新的稳定状态再开始读数记录。对不稳定的操作过程,从过程开始就应进行读数记录。为此就要在实验开始之前,充分熟悉方法并计划好记录的時刻或位置等。

② 记录数据应是直接读取原始数值,不要经过运算后再记录,例如秒表读数 $1\text{min}38\text{s}$,就应记为 $1'38''$,不要记为 $98''$ 。又如 U 形压差计两臂液柱高差,应分别读数记录,不应只读取或记录液柱的差值,或只读取一侧液柱的变化乘 2。

③ 根据测量仪表的精度,正确读取有效数字。例如 $1/10^{\circ}\text{C}$ 分度的温度计,读数为 22.24°C 时,其有效数字为四位,可靠值为三位。读数最后一位是带有读数误差的估计值,尽管带有误差,在测量时还应进行估计。

④ 对待实验记录应取科学态度,不要凭主观臆测修改记录数据,也不要随意舍弃数据。对可疑数据,除有明显原因,如读错、误记等情况使数据不正常可以舍弃之外,一般应在数据处理时检查处理。数据处理时可以根据已学知识,如热量衡算或物料衡算为根据,或根据误差理论舍弃原则来进行。

⑤ 记录数据应注意书写清楚,字迹工整。记错的数字应划掉重写,避免用涂改的方法,涂改后的数字容易误读或看不清楚。

(3) 实验报告

实验结束后,应及时处理数据,按实验要求认真地完成报告的整理编写工作。实验报告是实验工作的总结,编写组织报告也是对学生工作能力的培养,因此要求学生各自独立完成这项工作。

实验报告应包括以下内容:

- ① 实验题目;
- ② 实验目的或任务;
- ③ 实验基本原理;
- ④ 实验设备及流程(绘制简图),简要操作说明;
- ⑤ 原始数据记录;
- ⑥ 数据整理方法及计算示例,实验结果可以用列表、图形曲线或经验公式表示;
- ⑦ 分析讨论。

实验报告应力求简明,分析说理清楚,文字书写工整,正确使用标点符号。图表要整齐地放在适当位置,报告要装订成册。

报告中应写出学生姓名、班级、实验日期、同组人和指导教师姓名。

报告应在指定时间交指导教师批阅。

14 化工原理实验安全知识

化工原理实验室存在较多的安全风险,如危险品使用、实验操作、高温高压设备使用、废液收集处理等过程均存在危险因素。实验室中不仅有各种具有潜在危险的仪器设备,室内往往相对集中地存放了一定量的危险物品。常年与这些危险仪器设备、危险物品相伴,稍有不慎就有可能引发灼伤、火灾、爆炸、中毒、辐射、电击等各种安全事故。每一个进入实验室的实验人员都必须高度重视实验室的安全问题,牢固树立“安全第一”的思想,尽量减少或避免实验室安全事故的发生。

(1) 电器仪表使用安全

注意安全用电极为重要,对电器设备必须采取安全措施,操作者必须严格遵守下列操作规定。

- ① 进实验室时,必须清楚总电闸、分电闸所在位置,并能够正确开启。
- ② 使用仪器时,应注意仪表的规格,所用的规格应满足实验的要求(如交流或直流

电表、规格等),同时在使用时要注意读数是否有连续性等。

③ 一切仪器应按说明书装接适当的电源,需要接地的一定要接地。

④ 实验时不要随意接触连线处,不得随意拉拖电线、电机;搅拌器转动时,勿使衣服、头发、手等卷入。

⑤ 电器设备维修时应停电作业。

⑥ 对使用高压电、大电流的实验,至少要有 2~3 人进行操作。

⑦ 若电源为三相,则三相电源的中性点要接地,这样一旦触电时可降低接触电压;接三相电动机时要注意正转方向是否符合,否则要切断电源,对调相线。

⑧ 仪器发生故障时应及时切断电源。

⑨ 实验结束后,关闭仪器和总电闸。

(2) 气瓶使用安全

为了确保安全,在使用气瓶时,一定要注意以下几点。

① 领用高压气瓶(尤其是可燃、有毒的气体)应先通过感官和其他方式检查有无泄漏,可用皂液(除氧气瓶不可用)等方法查漏,若有泄漏不得使用,若使用中发生泄漏,应先关紧阀门,再由专业人员处理。

② 开启或关闭气阀应缓慢进行,以保护稳压阀和仪表,操作者应侧对气体出气口处,在减压阀与钢瓶接口处无泄漏的情况下,应首先打开钢瓶阀,然后调节减压阀。关气时应先关钢瓶阀,放净减压阀中余气,再松开减压阀。

③ 钢瓶内气体不得用尽,压力达到 1.5MPa 时应调换新钢瓶。

④ 搬运或存放钢瓶时,瓶顶稳压阀应带阀保护帽,以防破坏阀嘴。

⑤ 钢瓶放置应稳固,勿使之受震坠地。

⑥ 禁止把钢瓶放在热源附近,应距热源 80cm 以外,钢瓶温度不得超过 50℃

⑦ 可燃性气体(如氢气、液化石油气等)钢瓶附近严禁明火。

(3) 化学药品使用安全

一切药品瓶上都应粘贴标签;使用化学药品后应立即盖好盖子并把药品瓶放回原处;用牛角勺取固体药品或用量筒量取液体药品时,必须擦洗干净。在天平上称量固体药品时,应少取药品,并逐渐加到天平托盘上以免浪费。特别注意腐蚀性、有毒和危险化学药品的使用。

① 强酸对皮肤有腐蚀作用,且会损坏衣物,应特别小心,稀释硫酸时不可把水注入酸中,只能在搅拌下将浓硫酸缓缓倒入水中。

② 量取浓酸或类似液体时,只能用量筒,不应用移液管量取。

③ 盛酸瓶用完后,应立即用水将酸瓶冲洗干净。

④ 若酸溅到了身体的某个部位,应用大量水冲洗。

⑤ 浓氨水及浓硝酸瓶启盖时应特别小心,最好以布或纸覆盖后再启盖,如在炎热的夏天必须先以冷水冷却。

⑥ 氢氧化钠、氢氧化钾、碳酸钠、碳酸钾等碱性试剂的贮瓶,不可用玻璃塞,只能用橡胶塞或软木塞。

⑦ 大多数有机化合物有毒且易燃、易爆、易挥发,所以要注意实验室的通风。

⑧ 使用有毒的化学药品或在操作中可能产生有毒气体的实验,必须在通风橱内进行。

⑨ 金属汞是一种剧毒的物质,吸入其蒸气会中毒,可溶性的汞化合物会产生严重的急性中毒,故使用汞时不能把汞溅泼。如发现汞洒落应立即收起,不能回收的应立即用硫黄覆盖。

⑩ 易燃和易爆的化学药品应贮存在远离建筑物的地方,贮存室内要备有灭火装置。

⑪ 易燃液体在实验室只能用瓶盛装且不得超过 1L,否则就应当用金属容器类盛装;使用时周围不应有明火。

⑫ 蒸馏易燃液体时,最好不要用明火直接加热,装料不得超过 $2/3$,加热不可太快以避免局部过热。

⑬ 易燃物质如酒精、苯、甲苯、乙醚、丙酮等在实验桌上临时使用或暂时放在桌上的,都不能超过 500mL,并且应远离电炉和一切热源。

⑭ 在明火附近不得用可燃性热溶剂来清洗仪器,应用没有自燃危险的清洗剂来洗涤,或移到没有明火的地方去洗涤。

⑮ 乙醚长期存放后,常会含过氧化物,故蒸馏乙醚时不能完全蒸干,应剩余 $1/5$ 体积的乙醚,以免爆炸。

⑯ 避免金属钠和水接触,钠必须存放在无水的煤油中。

(4) 机械设备使用安全

由机械设备产生的危险主要是机械危险,在操作过程中要加以注意。

① 卷绕和绞缠 做回转运动的机械部件,常见的为轴类零件,如联轴器、主轴、丝杠等;回转件上的凸物和开口,如手轮的手柄、轴的突出键、螺栓或销、圆轮零件(链轮、齿轮、带轮)的轮辐等,在运动情况下,将人的头发、饰物(如项链)、肥大衣袖或下摆卷缠引起的伤害。

② 挤压、剪切和冲撞 做往复直线运动的零部件,如相向运动的两部件之间、运动件与静止部分之间由于安全距离不够产生的夹紧,直线运动的冲撞等。直线运动有横向运动和垂直运动,横向运动如大型机床的移动工作台、输送带链等;垂直运动如剪切机的压料装置和刀片、压力机的滑块、大型设备的升降台等。

③ 切割、戳扎、擦伤和碰撞 机械设备尖棱、立角、锐边,粗糙表面(如砂轮、毛坯),机械结构上的凸出、悬挂部分,如设备的支腿、吊杆、手柄等。这些由于形状产生的危险,无论物体是处于运动还是静止的状态,都可能引起伤害。

(5) 实验室安全事故处理

在实验操作过程中,总会不可避免地发生危险事故,如火灾、触电、中毒及其他意外事故。为了及时防止事故进一步扩大,在紧急情况下,应立即采取果断有效的措施。

① 割伤 取出伤口中的玻璃碎片或其他固体物,然后抹上红药水并包扎。

② 烫伤 切勿用水冲洗,轻伤涂以烫伤油膏、玉树油、鞣酸油膏或黄色的苦味酸溶液;重伤涂以烫伤油膏后立即去医院治疗。

③ 试剂灼伤 被酸或碱灼伤,应立即用大量水冲洗,然后相应地用饱和碳酸氢钠溶液或 2% 醋酸溶液洗,最后再用水洗。严重时要消毒,拭干涂以烫伤油膏。

④ 酸或碱溅入眼内 立即用大量水冲洗,然后相应地用 1% 碳酸氢钠溶液或硼酸溶液冲洗,最后再用水洗。溴水溅入眼内的处理方法相同。

⑤ 吸入刺激性或有毒气体 立即到室外呼吸新鲜空气。如有昏迷休克、虚脱或呼吸

机能不全者，可人工呼吸，可能时给予氧气和浓茶、咖啡等。

⑥ 毒物进入口内 对于强酸或强碱，先饮大量水，然后相应服用氢氧化铝膏、鸡蛋白或醋、酸果汁，再给以牛奶灌注。对于刺激剂及神经性毒物，先给以适量牛奶或鸡蛋白使之立即冲淡缓和，再给以 15%~25% 硫酸铜溶液内服，再用手指伸入咽喉部促使呕吐，然后立即送往医院。

⑦ 触电 应立即拉下电闸，切断电源，使触电者脱离电源。或戴上橡胶手套穿上胶底鞋或脚踏干燥木板绝缘后将触电者从电源上拉开。将触电者移至适当地方，解开衣服，必要时进行人工呼吸及体外心脏按压，并立即找医生处理。

⑧ 火灾 如一旦发生了火灾，应保持沉着镇静，首先切断电源、熄灭所有加热设备，移出附近的可燃物；关闭通风装置，减少空气流通，防止火势蔓延。同时立即拨打“119”求救。要根据起因和火势选用适当的方法。一般的小火可用湿布、石棉布或沙子覆盖燃烧物，即可熄灭。

火势较大时应根据具体情况采用下列灭火器：

① 四氯化碳灭火器 用于扑灭电器内或电器附近着火，但不能在狭小的、通风不良的室内使用（因为四氯化碳在高温时将生成剧毒的光气）。使用时只需开启开关，四氯化碳即会从喷嘴喷出。

② 二氧化碳灭火器 适用性较广，使用时应注意，一只手提灭火器，另一只手应握在喇叭筒把手上，而不能握在喇叭筒上（否则易被冻伤）。

③ 泡沫灭火器 火势大时使用，非大火通常不用，因事后处理较麻烦。使用时将筒身颠倒即可喷出大量二氧化碳泡沫。

无论使用何种灭火器，皆应从火的四周开始向中心扑灭。若身上的衣服着火，切勿奔跑，赶快脱下衣服；或用厚的外衣包裹使火熄灭；或用石棉布覆盖着火处；或就地卧倒打滚；或打开附近的自来水冲淋使火熄灭。严重者应躺在地上（以免火焰向头部）用防火毯紧紧包住直至火熄灭。烧伤较重者，立即送往医院。若个人力量无法有效阻止事故进一步发生，应该立即拨打“119”报告消防队。

（6）实验室环保操作规范

要注意实验室的环境，按实验室环保操作规范操作。

① 处理废液、废物时，一般要戴上防护眼镜和橡胶手套。有时要穿防毒服装。处理有刺激性和挥发性废液时，要戴上防毒面具在通风橱内进行。

② 接触过有毒物质的器皿、滤纸等要收集后集中处理。

③ 废液应根据物质性质的不同分别集中在废液桶内，贴上标签，以便处理。在集中废液时要注意，有些废液不可以混合，如过氧化物与有机物、盐酸等挥发性酸与不挥发性酸、铵盐及挥发性胺与碱等。

④ 实验室内严禁吃食品，离开实验室要洗手，如面部或身体被污染必须清洗。

⑤ 实验室内采用通风、排毒、隔离等安全环保防范措施。

第2章

实验数据的测量及误差

化学工程学科同其他工程学科一样,除了生产经验之外,实验研究是学科建立和发展的基础。在实验研究过程中需要测量实验数据,并对其进行分析、计算,整理成图表、公式或经验模型。为了保证实验结果的可靠性和准确性,必须正确测量、处理和分析这些数据。

2.1 实验数据的测量

测量是用实验的方法获得被测量量值的过程。按照测量对象和测量结果的关系分类,可将测量分为直接测量或间接测量。直接测量就是用测量量具或测量仪器直接给出被测几何量或物理量的量值过程。如用温度计测量温度、用尺子测量长度等均为直接测量。直接测量是实现物理量测量的基础,在实验过程中应用十分广泛。而通过直接测量和必要的数学运算才能得到被测量量值,这种测量称为间接测量。如平衡常数的测量,需要测量平衡时的温度、压力和组分浓度后,通过计算才能得到。实验需进行大量的数据测定工作,正确测定实验数据直接关系到实验结果的可靠性。

2.1.1 测量参数和实验点的选择

为了保证实验获得正确的结果,在实验过程中,应正确选择需要测量的参数和实验点的适宜分布。实验时应选择测量与研究对象相关的独立变量,如测量实验系统的介质流量、温度、压力及组成。

为了保证实验数据在处理过程中正确地反映各变量间的关系或在标绘成图形时分布合理,应正确选择实验点。通常变量间为线性关系时,实验点可以均匀分布。在对数坐标中呈线性关系的,其对数值为均匀分布,若按其真数设计实验点,则应随其数值增大而加大间隔。对于变量间存在非线性关系的情况,应随实验进程进行观察,当数据变化缓慢时,可加大取点间隔,若变化比较大时,则应减小间隔,以正确反映变化过程中的转折点。

2.1.2 数据的读取

(1) 有效数据的读取

实验数据的测量有直接测量和间接测量两种方法。直接测量值的有效数字的位数取决于测量仪器的精度。测量时,一般有效数字的位数可保留到测量仪器的最小刻度后一位,为估计数字。例如温度计的最小分度为 1°C 时,其有效数字可取至小数点后一位,如